

FePt 磁性薄膜の微細加工と磁気特性

| | |
|-----|---|
| 著者 | 幕田 裕和, 高橋 一法, 岩間 弘樹, 土井 正晶, 嶋 敏之 |
| 雑誌名 | 東北学院大学工学部研究報告 |
| 巻 | 50 |
| 号 | 1 |
| ページ | 15-18 |
| 発行年 | 2016-03-24 |
| URL | http://id.nii.ac.jp/1204/00000535/ |

東北学院大学工学会 工学部研究報告

FePt 磁性薄膜の微細加工と磁気特性

Magnetic properties of microfabricated FePt thin films

| | | |
|-----------------|--------------------|--------------|
| 幕田 裕和* | 高橋 一法** | 岩間 弘樹* |
| Hirokazu MAKUTA | Kazunori TAKAHASHI | Hiroki IWAMA |
| 土井 正晶** | 嶋 敏之** | |
| Masaaki DOI | Toshiyuki SHIMA | |

Abstract: The $L1_0$ ordered FePt alloy thin film has attracted much attention as a high-density magnetic recording media because of its huge uniaxial magnetic anisotropy and excellent thermal stability. It has been found that the coercivity of the FePt thin film is increased by reducing the particle size after circular dot arrays processing by microfabrication. In this study, highly ordered $L1_0$ FePt thin films were prepared, and the microfabrication was performed by electron beam lithography and Ar ion etching. Circular dots of desired shape were successfully prepared by etching at the optimum angle. The increase of coercivity was observed with the reduction in the diameter of the dots. The highest coercivity of 12.6 kOe was observed for $D = 0.3 \mu\text{m}$.

Keywords: $L1_0$ -FePt thin film, Circular dot array, Microfabrication, Coercivity

1 はじめに

磁気記録媒体の記録密度の上昇は著しく、近い将来 1 Tbit/in² に達するものと考えられている。現行の磁気記録媒体には Co-Cr 系合金が使用されているが、記録密度が 1 Tbit/in² に達した場合、記録ビットサイズが 20 nm を下回り熱揺らぎによる磁性粒子の超常磁性化が問題となることが予想される。そのため、20 nm 以下のサイズで安定に強磁性として振る舞う高い結晶磁気異方性を有する磁性材料が求められている。その有力な候補の一つとして、c 軸方向への約 $7.0 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$ もの大きな一軸結晶磁気異方性を有している $L1_0$ 型 FePt 規則合金が大きな注目を集めており[1]、これを磁気記録媒体へ応用するために数多くの研究が行われてきた[2] - [12]。また、近年では 1 Tbit/in² を大きく超える高密度磁気記録を実現するための媒体としてビットパターンドメディアが考案されており、その実用化に向けてドットパターンに微細加工され

た FePt 薄膜の磁気特性に関する研究が行われてきた[13] - [18]。その結果、電子ビームリソグラフィ装置および Ar イオンエッチング装置を用いた微細加工により作製された FePt 円形ドット配列試料において、粒子サイズの減少に伴い保磁力が上昇することが報告されている[17]。本研究では、高密度磁気記録媒体の設計指針を得ることを目的とし、微細加工によって粒子サイズを減少させた FePt 磁性薄膜の磁気特性に関してさらなる知見を得るため、FePt 円形ドット配列試料を作製し、その磁気特性評価を行った。

2 実験方法

薄膜試料は超高真空スパッタ装置を用いて作製した。MgO (100)単結晶基板上に Fe シード層 1 nm、Au バッファ層 40 nm を室温で成膜し、300 °C で 1 時間のアニーリングを施して Au の結晶化を促進させた。その後基板温度 300 °C で FePt 層を 5 ~ 30 nm 成膜し、500 °C で 1 時間のアニーリングを施して FePt を $L1_0$ 構造に規則化させた。微細加工は電子ビームリソグラフィ装置および Ar イオンエッチング装置を用いて行った。微細加工手順は以下の

* 東北学院大学大学院

** 東北学院大学

通りである。まず、スピンドーターを用いて試料表面に電子ビーム用ネガレジスト TGMR 3.6 cp を回転塗布した。レジスト溶液の溶剤を飛ばすためにホットプレートを用いて 120°C で 90 秒間のベーキングを施した後、電子ビームリソグラフィ装置を用いてドットパターンの描画を行った。描画後、レジストを薄膜表面に定着させるため再び 120°C で 90 秒間のベーキングを施した後、NMD 溶液に 60 秒間さらしてパターンの現像を行った。現像後、Ar イオンエッチング装置によりステージを回転させながらエッチングを行った。エッチング条件は、到達真空度 2.0×10^{-3} Pa、Ar 流量 0.90 sccm、イオン加速電圧 350 V ~ 500V、エッチング角度 $0^\circ \sim 70^\circ$ 、エッチング時間 40 秒とした。エッチング後、残留したレジストを超音波洗浄して除去して FePt ドット配列パターンを得た。薄膜の結晶構造解析は X 線回折計(XRD)、磁気特性評価は超伝導量子干渉磁束計(SQUID)、ドットの形状評価は原子間力顕微鏡 (AFM)、磁気特性評価は極 Kerr 効果測定装置 (μ -MOKE)を用いて行った。

3 結果と考察

3.1 FePt 単層薄膜の構造と磁気特性

まず、FePt 層厚 t_{FePt} を変化した薄膜試料の作製および結晶構造解析、磁気特性評価を行った。FePt 単層薄膜の XRD パターンを Fig. 1 に示す。(a)、(b)、(c)はそれぞれ $t_{\text{FePt}} = 5, 10, 30$ nm の測定結果を示している。いずれの試料からも FePt (002) 基本反射ピークと FePt (001) および (003) 超格

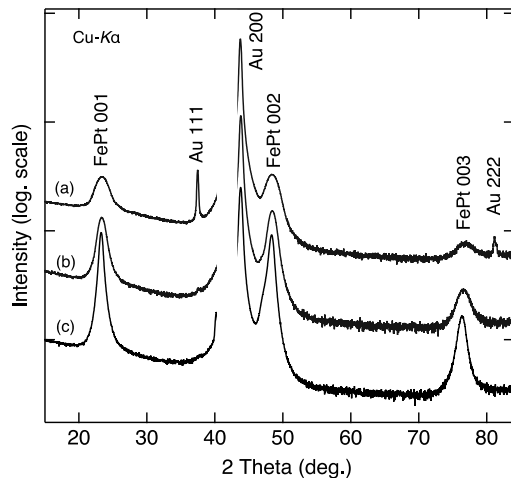


Fig. 1. XRD patterns for the FePt thin films with $t_{\text{FePt}} =$ (a) 5 nm, (b) 10 nm and (c) 30 nm.

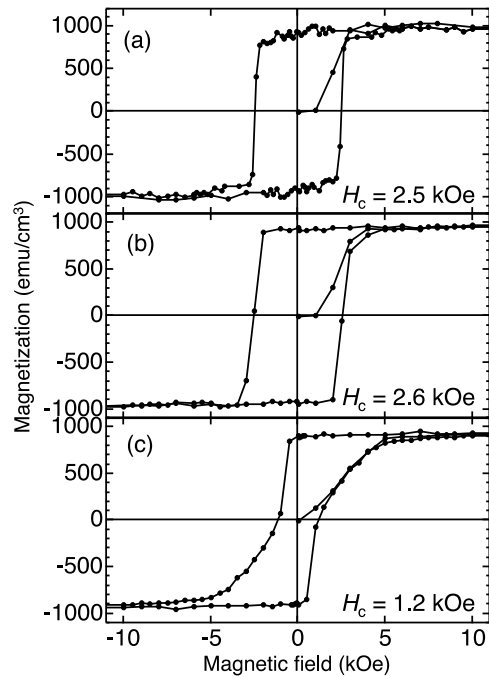


Fig. 2. Magnetization curves for the FePt thin films with $t_{\text{FePt}} =$ (a) 5 nm, (b) 10 nm and (c) 30 nm.

子反射ピークが明瞭に観察されたことから、FePt 層の規則化と (001) 配向が確認され、磁化容易軸方向が薄膜面に対して垂直な FePt 薄膜が得られていることが分かった。FePt 薄膜の磁化曲線を Fig. 2 に示す。 $t_{\text{FePt}} = 5$ nm、10 nm では 2.6、2.5 kOe の保磁力が確認されたが、 $t_{\text{FePt}} = 30$ nm に増加させると 1.2 kOe に低下した。Au の格子定数 $a = 4.08$ Å と FePt の格子定数 $a = 3.85$ Å の間には約 5.6 % の格子間不整合があり、これによって Au との界面近傍の FePt には内部応力が働き、 a が Au のそれに近づくように伸長され、歪んでいることが考えられる。一般的に、このような内部応力による歪みは磁壁の移動を妨げるため、結果として保磁力の増加に起因する。この歪みは t_{FePt} の増加に伴い緩和されるが、 $t_{\text{FePt}} = 10$ nm 以下の場合、歪みが完全に緩和されずに残っていることが考えられ、それが $t_{\text{FePt}} = 30$ nm の薄膜よりも大きな保磁力を示した原因であると推論される。

3.2 エッチング角度に対するドット形状の変化

Ar イオンエッチングでは、エッチングされた物質のドットの側面への再付着が発生する。FePt 薄膜をエッチングすると、FePt 層から発生する Fe、Pt 原子がドット側面に付着する。これによって形成される FePt 層は規則構造を持っておらず、外部磁場に

対して容易に磁化回転する。この磁化回転は $L1_0$ 規則化した FePt ドットに伝搬し、FePt ドットの保磁力を低下させる要因となることから、ドットの直径と保磁力の関係を正しく評価することが困難になる。このような理由から、再付着がなるべく少なくなるエッチング条件の探索のために、Ar イオンビームの入射角度を変化させてエッチングを行いドット形状の観察を行った。ドットパターン作製には $t_{\text{FePt}} = 5 \text{ nm}$ の FePt 薄膜を使用した。これは、先述したように、 $t_{\text{FePt}} = 5 \text{ nm}$ の FePt 薄膜で比較的大きな保磁力が得られたことと、より薄い薄膜の方がエッチング時間を短くすることができ、再付着を少なく抑えることが期待できるためである。ドットの直径 $D = 0.4 \sim 2 \mu\text{m}^\circ$ においてドット間隔を $0.5, 1 \mu\text{m}$ と変化した場合、さらに、 $D = 0.1 \sim 2 \mu\text{m}^\circ$ においてドット間隔を $0.3 \mu\text{m}$ とした場合のそれぞれのエッチング角度に対するドットの形状の変化を調べた。ドット間隔は Fig. 3 に示すように、隣接したドットの互いに面した面同士の距離を指している。まず、 $D = 2 \mu\text{m}^\circ$ 、ドット間隔を $1 \mu\text{m}$ とした場合の角度を変化させてエッチングしたドットパターンの AFM を Fig. 4

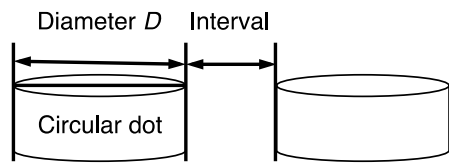


Fig. 3. Definitions of the diameter D for dots and the interval between adjacent dots.

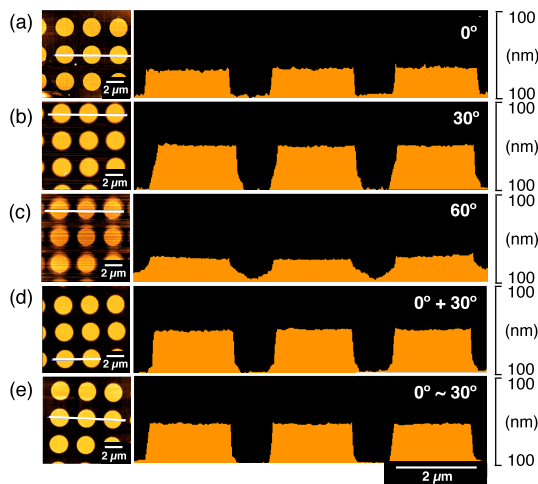


Fig. 4. AFM plane view and cross-sectional images for the FePt dots etched with etching angle of (a) 0° , (b) 30° , (c) 60° , (d) 0° and 30° and (e) varying from 0° to 30° . The angle of 0° is perpendicular angle to the film plane. The interval between adjacent dots is $1 \mu\text{m}$.

に示す。このとき、イオン加速電圧は 350 V とした。エッチング角度 0° が薄膜面に対して垂直方向である。ドットの平面像から、エッチング角度 $0^\circ \sim 20^\circ$ のドットの縁にわずかに再付着が観察された。エッチング角度 30° 以上からはほぼ再付着が見られなくなったが、ビームを斜めに入射したことによりドット底部が広がってしまい、垂直に切り立った形状が得られなかった。そこで、垂直に切り立ったドットの形状が得られる 0° と、再付着の軽減効果が見られはじめる 30° でのエッチングを組み合わせたドット試料を作製し、その形状を観察した。エッチング方法は、 0° で 30 秒間エッチングした後、さらに 30° で 30 秒間エッチングする方法 [Fig. 4 (d)] と、 0° から 30° まで 60 秒間でエッチング角度を連続的に変化させる方法 [Fig. 4 (e)] の2種類を検討した。結果は、両者ともに再付着が全くと言っていいほど見られず、底部がやや広がっているものの、切り立った形状のドットが得られた。前者の方法では、ドットが垂直な部分と底部が広がった部分にわかれた形状をしていたが、後者の方法では、エッチング角度を連続的に変更させたためかドットの側面は滑らかになっていた。この結果は、 $D = 0.4, 0.6, 1 \mu\text{m}^\circ$ 、さらに $D = 2 \mu\text{m}^\circ$ 、ドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ とした場合でも得られた。これらの結果から、ドット間隔 $1 \mu\text{m}$ の場合、良好なドット形状を得るために 0° と 30° でのエッチングを組み合わせることが有効である。

しかしながら、 $D = 1 \mu\text{m}^\circ$ 、ドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ としたとき、この条件で作製したドットには多量の再付

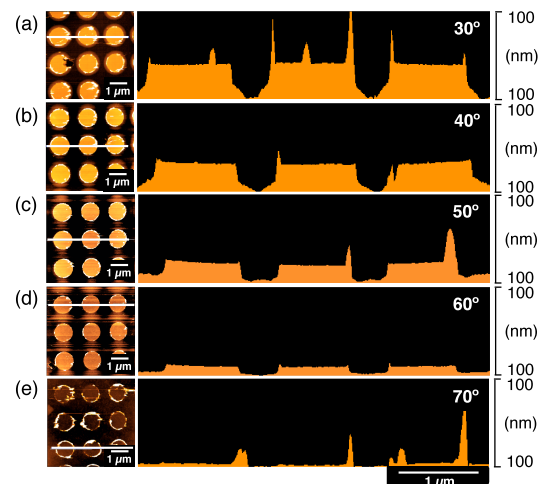


Fig. 5. AFM plane view and cross-sectional images for the FePt dots etched with etching angle of (a) 30° , (b) 40° , (c) 50° , (d) 60° and (e) 70° . The angle of 0° is perpendicular angle to the film plane. The interval between adjacent dots is $0.5 \mu\text{m}$.

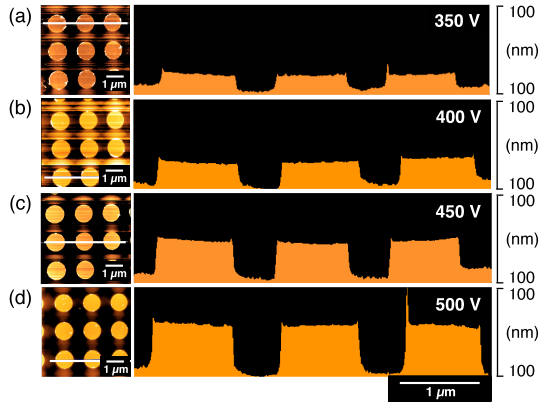


Fig. 6. AFM plane view and cross-sectional images for the FePt dots etched with ion accelerating voltage of (a) 350 V, (b) 400 V, (c) 450 V and (d) 500 V. The interval between adjacent dots is 0.5 μm .

着物が確認されたため、最適なエッチング角度の再検討を行った。 $D = 1 \mu\text{m}^\phi$ 、ドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ とした場合の角度を変化させてエッチングしたドットパターンの AFM を Fig. 5 に示す。エッチング角度 $30^\circ \sim 50^\circ$ では再付着が多く見られたが、エッチング角度 60° では再付着の量を減らすことができた。エッチング角度 70° ではレジスト側面に付着したと思われる再付着物だけが残し、ドットは形成されていなかった。これらの結果から、ドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ の場合は 60° のエッチングが最適だと言える。また、 0° のエッチングは組み合わせずとも、比較的切り立った形状のドットが得られた。

エッチング角度を検討しただけでは再付着が十分に軽減されているとは言えないため、次にイオン加速電圧を再検討した。エッチング角度 60° に固定してイオン加速電圧を 350V から 500V まで変化させてエッチングを行った結果を Fig. 6 に示す。350V からイオン加速電圧を上昇させるにつれ再付着は少なくなっていく、450V で大きく再付着が軽減されていた。しかしながら、500V においては高い再付着物が見られるようになった。これらの結果から、イオン加速電圧については 450V が最適だと考えられる。この結果は、 $D = 0.4, 0.6, 1 \mu\text{m}^\phi$ の場合でも得られた。

また、 $D = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 1, 2 \mu\text{m}^\phi$ 、ドット間隔 $0.3 \mu\text{m}$ とした場合でも、エッチング角度 60° 、イオン加速電圧 450V でドットをエッチングすることにより良好な形状のドットが得られた。

これらの結果をまとめると、 $D = 0.4 \sim 2 \mu\text{m}^\phi$ 、ドット間隔 $1 \mu\text{m}$ の場合及び、 $D = 2 \mu\text{m}^\phi$ 、ドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ の場合は、イオン加速電圧は 350V とし、エッ

チング角度は 0° と 30° を組み合わせることが最適であった。 $D = 0.4 \sim 1 \mu\text{m}^\phi$ 、ドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ の場合、 $D = 0.1 \sim 2 \mu\text{m}^\phi$ 、ドット間隔 $0.3 \mu\text{m}$ の場合は、イオン加速電圧は 450V とし、イオン入射角度は 60° が最適であった。

3.3 ドットサイズおよびドット間隔に対する磁気特性の変化

$t_{\text{FePt}} = 5 \text{ nm}$ の FePt 薄膜を微細加工してドットの直径 D とドット間隔を変化させたドット配列パターンを作製し、その磁気特性の変化を調べた。微細加工前の連続膜および微細加工後のドット間隔 $1 \mu\text{m}$ 、 $D = 0.4 \sim 2 \mu\text{m}^\phi$ の FePt 円形ドット配列の MOKE 曲線を Fig. 7 に示す。保磁力 $H_c = 2.3 \text{ kOe}$ を示した連続膜を $D = 2 \mu\text{m}^\phi$ の円形ドットに微細加工すると $H_c = 5.7 \text{ kOe}$ に大きく増加した。さらに D を減少させると H_c は増加傾向を示し、 $D = 0.4 \mu\text{m}^\phi$ で $H_c = 6.3 \text{ kOe}$ が得られた。さらに、これと良く似た傾向がドット間隔を $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \mu\text{m}$ と狭めた $D = 0.4 \sim 2 \mu\text{m}^\phi$ のドット配列でも確認された。作製したすべてのドット配列パターンの H_c を Table. 1 に示す。ドットサイズの減少に伴って磁化反転領域の広がりが見られた。これは、個々のドットのサイズや形状が磁気特性に影響することから、それらの不均一さに起因してドットの反転磁界に分布が生じ、ドットが一斉に磁化反転せず、反転磁界の小さいドットから順に磁化反転したためであると考えられ [19]、直径が小さくなるほど、サイズや形状のわず

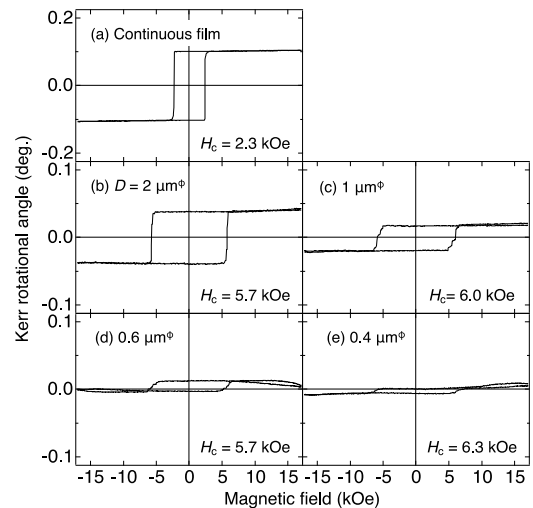


Fig. 7. MOKE curves for (a) the FePt continuous film dots and the dots with $D =$ (b) $2 \mu\text{m}^\phi$, (c) $1 \mu\text{m}^\phi$, (d) $0.6 \mu\text{m}^\phi$ and (e) $0.4 \mu\text{m}^\phi$. The interval between adjacent dots is $1 \mu\text{m}$.

Table. 1. H_c for the all FePt continuous film and dots

| Sample | Interval (μm) | Continuous film | H_c (kOe) | | | | | | |
|--------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | $D = 2$ μm^ϕ | $D = 1$ μm^ϕ | $D = 0.6$ μm^ϕ | $D = 0.4$ μm^ϕ | $D = 0.3$ μm^ϕ | $D = 0.2$ μm^ϕ | $D = 0.1$ μm^ϕ |
| 1 | 1 | 2.3 | 5.7 | 6.0 | 5.7 | 6.3 | - | - | - |
| 2 | 0.5 | 1.5 | 4.2 | 4.9 | 5.5 | 7.0 | - | - | - |
| 3 | 0.3 | 3.3 | 7.6 | 8.6 | 9.5 | 10.0 | - | - | - |
| 4 | 0.3 | 2.9 | - | - | - | - | 12.6 | 8.1 | 10.2 |

かな差異でも反転磁界に敏感に影響し、その分布がより広くなったものと思われる。ドット間隔 $0.3 \mu\text{m}$ においては、さらにサイズの小さい $D = 0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}^\phi$ も作製した。Fig. 8 に示すように $D = 0.3 \mu\text{m}^\phi$ においては、 $H_c = 12.6 \text{ kOe}$ の非常に大きな保磁力が確認されたが、 $D = 0.1 \mu\text{m}^\phi$ 、 $0.2 \mu\text{m}^\phi$ では $D = 0.3 \mu\text{m}^\phi$ と比較して H_c が減少した。エッチングによるダメージがもたらす FePt 層の不規則化が原因と考えられ、小さなドットサイズではこの不規則層の

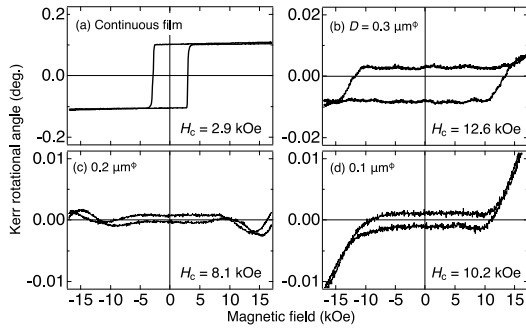


Fig. 8. MOKE curves for (a) the FePt continuous film dots and the dots with $D =$ (b) $0.3 \mu\text{m}^\phi$, (c) $0.2 \mu\text{m}^\phi$ and (d) $0.1 \mu\text{m}^\phi$. The interval between adjacent dots is $0.3 \mu\text{m}$.

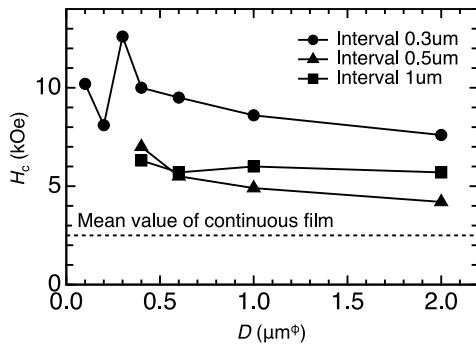


Fig. 9. H_c as a function of D for the FePt dots. Circles, triangles and squares are the data for the Interval between adjacent dots of $0.3 \mu\text{m}$, $0.5 \mu\text{m}$ and $1 \mu\text{m}$ respectively. The dots line denotes the value of mean H_c for the continuous film.

体積分率が大きくなるため H_c の減少に繋がったものと推察される[15]。ドットの D に対する H_c の変化を Fig. 9 に示す。どのドット間隔においても D の減少に伴い H_c が緩やかに上昇し、 $D = 0.4 \mu\text{m}^\phi$ 付近から急激な H_c の上昇が確認された。これは $D = 0.4 \mu\text{m}^\phi$ 付近で FePt の磁区構造が単磁区構造に近づいたためであると思われる。ドット間隔 $0.3 \mu\text{m}$ においてはドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ と比較して全体的に高い H_c が観察されたが、これは微細加工前の連続膜の時点で H_c が他の連続膜より 40%以上高かったことが大きな原因であると考えられる。そのため、ドット間隔に対する明確な H_c の変化を観察することはできなかった。

4 結論

本研究では、高密度磁気記録媒体の設計指針を得ることを目的とし、微細加工によって粒子サイズを減少させた FePt 磁性薄膜の磁気特性に関してさらなる知見を得るため、FePt 円形ドット配列試料を作製し、その磁気特性評価を行った。その結果、次のことが明らかとなった。まず、良好なドット形状が得られるエッチング角度の条件は、ドット間隔 $1 \mu\text{m}$ の場合は、イオン加速電圧は 350V とし、エッチング角度は 0° と 30° を組み合わせることが最適であった。そしてドット間隔 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $0.3 \mu\text{m}$ の場合は、イオン加速電圧は 450V とし、イオン入射角度は 60° が最適であった。ドットサイズおよびドット間隔に対する磁気特性の変化については、薄膜を円形ドット配列に微細加工することにより大きく保磁力が増加し、さらにドットサイズを減少させることによって保磁力が上昇することが確認された。 $D = 0.4 \mu\text{m}^\phi$ 付近より小さくなると保磁力の急激な増加が見られた。ドット間隔 $0.3 \mu\text{m}$ 、 $D = 0.3 \mu\text{m}$ の円形ドット配列試料において、 12.6 kOe の保磁力が得られたが、さらに小さな $D = 0.1 \mu\text{m}^\phi$ 、 $0.2 \mu\text{m}^\phi$ では保磁力の減少が確認された。本研究で得られたこれらの知見は、高密度磁気記録媒体の設計指針を与えるものと期待される。

謝辞

本研究は東北学院大学ハイテクリサーチセンターにて行われたものである。

参考文献

- [1] O. A. Ovanov, L. V. Solina, V.A. Demshina, and L. M. magat: “Determination of the anisotropy constant and saturation magnetization, and magnetic properties of powder of an iron-platinum alloy”, *Phys. Met. Metalloger.*, Vol.35 No.1 (1973), pp.81/pp.85.
- [2] M. R. Visokay and R. Sinclair: “Direct formation of ordered CoPt and FePt compound thin films by sputtering”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.66 No.13 (1995), pp.1692 /pp.1694.
- [3] F. R. C. Farrow, D. Weller, R. F. Marks, M. F. Toney, A. Cebollada, and G, R, Harp: “Control of the axis of chemical ordering and magnetic anisotropy in epitaxial FePt films”, *J. Appl. Phys.*, Vol.79 No.8 (1996), pp.5967/pp.5969.
- [4] F. R. C. Farrow, D. Weller, R. F. Marks, M. F. Toney, D. J. Smith, and M. R. McCertney: “Magnetic anisotropy and microstructure in molecular beam epitaxial FePt (110)/MgO (110)”, *J. Appl. Phys.*, Vol.84 No.2 (1998), pp.934/pp.939.
- [5] D. Ravelosona, C. Chappert, and V. Mathet: “Chemical order induced by ion irradiation in FePt (001) films”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.76 No.2 (2000), pp.236/pp.238.
- [6] M. M. Schwickert, K. A. Hannibal, M. F. Toney, M. Best, J. Folks, J. -U. Thiele, A. J. Kellock, and D. Weller: “Temperature dependent chemical ordering in FePt(001) and FePt(110) films”, *J. Appl. Phys.*, Vol.87 No.9 (2000), pp.5956/pp.5958.
- [7] C. L. Platt, K. W. Wierman, E. B. Svedberg, R. van de Veerdonk, and J. K. Howard: “L₁₀ ordering and microstructure of FePt thin films with Cu, Ag, and Au additive”, *J. Appl. Phys.*, Vol.92 No.10 (2002), pp.6104/pp.6109.
- [8] T. Shima, T. Moriguchi, S. Mitani, and K. Takanashi: “Low-temperature fabrication of L₁₀ ordered FePt alloy by alternate monatomic layer deposition”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.80 No.2 (2002), pp.288/pp.290.
- [9] T. Shima, K. Takanashi, G. Q. Li, and S. Ishio: “High coercivity and magnetic domain observation in epitaxially grown particulate FePt thin films”, *Mater. Trans.*, Vol.266 No.1-2 (2003), pp.171/pp.177.
- [10] T. Shima, K. Takanashi, Y. K. Takahashi, and K. Hono: “Coercivity exceeding 100 kOe in epitaxially grown FePt sputtered films”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.85 No.13 (2004), pp.2571/pp.2573.
- [11] C. Y. You, Y. K. Takahashi, and K. Hono: “Particulate structure of FePt thin films enhanced by Au and Ag alloying”, *J. Appl. Phys.*, Vol.100 No.5 (2006), pp.056105-1/pp.056105-3.
- [12] A. Perumal, Y. K. Takahashi, T. O. Seki, and K. Hono: “Particulate structure of L₁₀ ordered ultrathin FePt films for perpendicular recording”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.92 No.23 (2008), pp.132508-1/pp.132508-3.
- [13] O. Kazakova, M. Hanson, and E. B. Svedberg: “Magnetic Properties Of FePt Circular Dots”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.39 No.5 (2003), pp.2747/pp.2749.
- [14] N. Kikuchi, S. Okamoto, O. Kitakami, Y. Shimada, and K. Fukamichi: “Sensitive detection of irreversible switching in a single FePt nanosized dot”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.82 No.24 (2003), pp.4313/pp.4315.
- [15] T. Seki, T. Shima, K. Yakushiji, K. Takanashi, G. Q. Li, and S. Ishio: “Improvement of Hard Magnetic properties in microfabricated L₁₀-FePt dot Arrays upon post-annealing”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.41 No.10 (2005), pp.3604/pp.3606.
- [16] T. Seki, T. Shima, K. Yakushiji, K. Takanashi, G. Q. Li, and S. Ishio: “Dot size dependence of magnetic properties in microfabricated L₁₀-FePt (001) and L₁₀-FePt (110) dot arrays”, *J. Appl. Phys.*, Vol.100 No.4 (2006), pp.043915-1/pp.043915-8.
- [17] D. Wang, T. Seki, K. Takanashi, T. Shima, G. Li, H. Saito, and S. Ishio: “Dot size dependence of magnetization reversal process in L₁₀-FePt dot arrays”, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.44 No.11 (2008), pp.3464/pp.3467.
- [18] Y. Seki, H. Iwama, T. Shima, and K. Takanashi: “Size dependence of the magnetization reversal process in microfabricated L₁₀-FePt nano dots”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.44 No.33 (2011), pp.335001-1/pp.335001-10.
- [19] H. J. Richter, A. Y. Dobin, O. Heinonen, K. Z. Gao, R. J. M. v. d. Veerdonk, R. T. Lynch, J. Xue, D. Weller, P. Asselin, M. F. Erden, and R. M. Brockie: “Recording on bit-patterned

media at densities of 1 Tb/in² and beyond”,
IEEE Trans. Magn., Vol.42 No.10 (2006),
pp.2255/pp.2260.